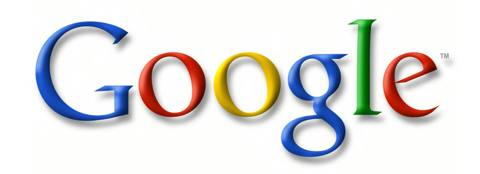
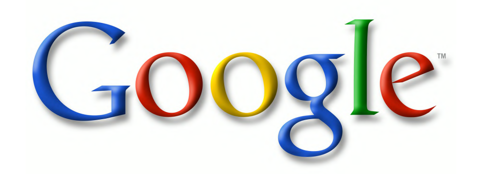
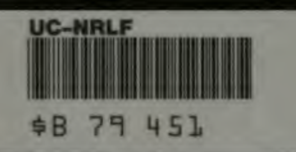






Müller,
Elektrische Maschinen.



Die Elektrischen Maschinen

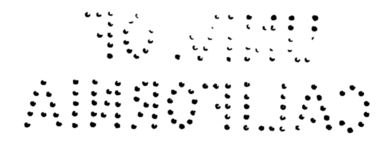
unter Berücksichtigung ihrer geschichtlichen Entwickelung.

Von

E. N. Müller
in Marne (Holstein).

Mit 12 Abbildungen.

Hamburg.
Verlagsanstalt und Druckerei A.-G. (vormals J. F. Richter).
1890.



Druck der Verlagsanstalt und Druckerei Actien-Gesellschaft
(vormals J. F. Richter) in Hamburg.

Unser Jahrhundert darf mit einem gewissen Stolz auf eine große Reihe wichtiger Entdeckungen zurückblicken, durch welche wir in den Stand gesetzt sind, die Naturkräfte unserem Willen dienstbar zu machen. In vielen Fällen war allerdings nur nöthig, Vermächtnisse weiter zurückliegender Zeiten unter neuen Gesichtspunkten zu verwerthen. Ein Gebiet aber giebt es, das unser Jahrhundert als sein unbeschränktes Eigenthum für sich in Anspruch nehmen kann, nämlich das Gebiet des Galvanismus; denn erst vor hundert Jahren (1789) machte Galvani die ersten Beobachtungen über Erscheinungen, welche durch die nach ihm benannte Elektrizität hervorgerufen werden. Und gerade dem Galvanismus war es vorbehalten, dem rastlosen Getriebe unserer Zeit seinen eigenartigen Stempel aufzudrücken. 1833 konstruirten Gauß und Weber in Göttingen den ersten brauchbaren galvanischen Telegraphen, 1866 wurde Amerika durch das Kabel mit Europa verbunden und an die unzähligen Drähte, die theils über, theils unter der Erde den elektrischen Funken im Dienste der Menschheit leiten, schließen sich seit dem letzten Jahrzehnt auch noch die Fernsprecheinrichtungen, mit denen jetzt schon alle größeren Städte versehen sind. Ohne Zweifel ist der Telegraph die wichtigste Erfindung unseres Jahrhunderts; es hat sich aber zu ihm in neuerer Zeit noch

eine Maschine gesellt, die wie er dem Gebiete des Galvanismus angehört und gleichfalls ein wichtiger Faktor in der Kulturentwickelung zu werden verspricht. Es ist dies die Dynamomaschine mit all ihren zahlreichen Verwendungen. Wohl arbeitet sie zum größten Theil noch in engbegrenzten Räumen, als Lichtmaschine aber ist sie wegen des sonnenhellen Glanzes, mit dem sie unser Auge zu blenden vermag, schon Jedwedem bekannt, und immer häufiger wird auch die Anwendung derselben als Bewegungsmaschine. Vielleicht ist die Zeit nicht mehr allzufern, in der jedes Haus, wenigstens in den Städten, außer mit einer Leitung für Gas und Wasser auch mit einer Leitung für Elektrizität versehen ist. Die ungemein hohe Stellung, welche die Dynamomaschine schon jetzt unter den Werkzeugen unseres Willens einnimmt, ist es, welche uns veranlaßt, bei dem Schlusse des ersten Jahrhunderts des galvanischen Zeitalters mit einer eingehenden Besprechung dieser Maschine unter Hinzuziehung ihrer geschichtlichen Entwickelung vor ein größeres gebildetes Publikum zu treten.

Im Frühling des Jahres 1820 machte der Däne Oersted in Kopenhagen die Entdeckung, daß der galvanische Strom im stande ist, die Magnetnadel aus ihrer Ruhelage herauszudrehen. Die Nachricht von dieser Beobachtung verbreitete sich mit einer Schnelligkeit, die im höchsten Grade unser Erstaunen wachrufen muß, wenn wir bedenken, wie unvollkommen in damaliger Zeit die Verkehrsmittel waren. Im Juli 1820 erst veröffentlichte Oersted seine Entdeckung in einer kleinen Abhandlung. Bald darauf wiederholte de la Rive diese Experimente auf einer Naturforscherversammlung in Genf, und nun ergriff ein wahrer Feuereifer das gebildete und halbgebildete Publikum. Jeder, der sich ein galvanisches Element[1] und eine Magnetnadel verschaffen konnte, ließ letztere ihre geheimnißvollen Tänze[2] aufführen. Es macht auf uns den Eindruck, als ob man schon

geahnt hätte, daß eine neue Zeit mit der Oerstedschen Entdeckung beginne. Und wenn auch noch volle 13 Jahre verflossen, ehe Weber und der große Gauß den ersten praktisch verwendbaren Nadeltelegraphen anfertigten, so folgten doch die Arbeiten der Gelehrten, welche sich dem neu entdeckten Zweige der Physik zuwandten, mit einer ganz außerordentlichen Schnelligkeit aufeinander. Für unsere Zwecke genügt es hervorzuheben, daß schon im September des Jahres 1820 der Franzose Arago die Beobachtung machte, daß ein Draht,[3] welcher vom galvanischen Strom durchflossen wird, Eisenfeile anzuziehen vermag, daß ferner ebenfalls noch im September 1820 Ampère die grundlegenden Beobachtungen zu der langen Reihe von Entdeckungen machte, welche 1826 in der Ampèreschen Theorie des Magnetismus ihren Abschluß fanden. Die praktischen Resultate dieser Theorie lassen sich, soweit sie für unsere Zwecke erforderlich sind, in folgende Sätze zusammenfassen: Jeder Magnet kann als eine von elektrischen Strömen durchflossene Drahtspirale angesehen werden. Hat der Beobachter den Nordpol des Magnets vor sich, so bewegt sich der positive Strom in der Drahtspirale links herum d. h. dem Zeiger der Uhr entgegengerichtet, hat er dagegen den Südpol vor sich, so läuft der positive Strom rechts herum. Umgekehrt kann auch jede von einem galvanischen Strome durchflossene Drahtspirale an die Stelle eines Magnets treten.

Obgleich aber bereits im Jahre 1822 Ampère die magnetischen Wirkungen der galvanischen Spirale, welcher er den Namen Solenoid gab, vollkommen bekannt waren, kam man doch erst im Jahre 1826 von anderer Seite — Brewster und Sturgeon, beide unabhängig voneinander — auf den Gedanken, in eine vom galvanischen Strom durchflossene Drahtspirale einen Stab weichen Eisens zu stecken. Die magnetischen Wirkungen eines

solchen Eisens, Elektromagnet genannt, setzten die Physiker der damaligen Zeit in das größte Erstaunen. Professor Pfaff, welcher die Wirkungen eines Elektromagnets in London sah, brach in die Worte aus: „Es grenzt an Zauberei, in dem Augenblicke, da man mit einem der Drähte den Kreis (Strom) schließt und so den elektrischen Strom einleitet, selbst aus einiger Entfernung den mit 8 Pfund und darüber beschwerten Anker angezogen zu sehen, der ebenso augenblicklich wieder abfällt, wenn der Kreis unterbrochen wird.[4]

Es ist verzeihlich, daß man sich durch die gewaltigen Kraftwirkungen der Elektromagnete zu den kühnsten Hoffnungen hinreißen ließ. Man glaubte durch dieses neue Prinzip der Kraftumsetzung die Dampfmaschine in den Schatten stellen zu können. Bereits im Jahre 1830 baute Salvatore del Negro in Padua die erste elektromotorische Maschine. Die Leistungen derselben waren allerdings recht unbedeutende. Trotzdem ließ man sich aber nicht abschrecken, weitere Versuche zu machen.

Im Jahre 1838 hatte der durch die Entdeckung der Galvanoplastik bekannte Jakobi eine Bewegungsmaschine fertig gestellt, bei welcher vier festliegende und vier rotirende Elektromagnete zur Anwendung kamen, während der elektrische Strom in 64 Zinkplatin-Elementen erzeugt wurde. Durch diese Maschine wurde nun auch wirklich ein Boot, welches 12 Personen trug, auf der Newa in Bewegung gesetzt, der Nutzeffekt erreichte aber nicht ganz eine Pferdekraft, während sich die Kosten unverhältnißmäßig hoch stellten. An eine praktische Verwendung derartiger Maschinen war daher gar nicht zu denken. Nachdem dann noch einige Jahre hindurch ein Frankfurter J. P. Wagner es verstanden hatte, weitere Kreise für eine von ihm zu konstruirende galvanische Lokomotive zu interessiren, ohne jedoch irgend welchen praktischen Erfolg ermöglichen zu können, gab man endlich gegen die Mitte der vierziger Jahre diese Versuche als völlig aussichtslos auf.

Bereits im zweiten Decennium unseres Jahrhunderts wurden indes die Beobachtungen gemacht, deren Weiterverfolgung in der neuesten Zeit endlich zu der Konstruktion der bewunderungswürdigen elektrischen Maschinen führte, kurz Dynamos genannt. Hierdurch wurden nicht nur die Träume eines Jacobi und Wolf verwirklicht, sondern diese Maschinen gestatteten noch mehrere andere Anwendungen, unter denen die Herstellung des elektrischen Lichtes, die Erzeugung hoher Temperaturen und die verschiedenartigsten galvanischen Zersetzungen die wichtigsten sind. Arago machte nämlich im Jahre 1824 die Beobachtung, daß die Schwingungen einer Magnetnadel bedeutend verlangsamt werden, wenn man dieselbe dicht über einer Kupferscheibe anbringt. Dieselbe Erscheinung beobachtete er auch, wenn er das Kupfer durch andere, die Elektrizität gut leitende, Metalle ersetzte. Im nächsten Jahre führten seine weiteren Untersuchungen zu der Entdeckung, daß eine Magnetnadel drehende Bewegung annimmt, wenn man in ihrer unmittelbaren Nähe eine Kupferscheibe rasch um ihre Achse laufen läßt. Die Kupferscheibe war bei diesen Versuchen durch eine Glasplatte von der Magnetnadel getrennt, damit die entstehende Luftbewegung keinen Einfluß auf die Nadel haben konnte. Eine richtige Erklärung dieser Thatsache wußte man aber nicht zu geben. Erst als Faraday im Jahre 1831 die galvanische Induktion entdeckte, fanden hierdurch die bis dahin räthselhaft gebliebenen Beobachtungen Aragos ihre ungezwungene Erklärung.

Faraday wickelte zwei übersponnene Drähte zu einer Rolle auf und setzte die Enden des einen Drahtes mit einem Galvanometer[5] in Verbindung, während er die anderen an den Polschrauben eines galvanischen Elementes befestigte. Als er nun zu wiederholten Malen den galvanischen Strom durch den einen Draht schickte, bemerkte er, daß die Magnetnadel beim jedesmaligen Oeffnen und Schließen des Stromes eine

Ablenkung erfuhr. Aus der Richtung dieser Ablenkung folgte, daß beim Schließen der Kette in dem mit dem Galvanometer verbundenen Draht ein Strom entstand, welcher dem des galvanischen Elementes entgegengerichtet, beim Oeffnen dagegen mit demselben gleichgerichtet war.

Dem neuentdeckten Strom gab man den Namen Induktionsstrom. Die weitere Verfolgung dieser Entdeckung führte bald zu der Abänderung des Apparates, daß die beiden Leitungsdrähte getrennt in Spiralen aufgewickelt wurden, welche übereinandergeschoben werden konnten. Für die innere Rolle, durch welche der Strom der galvanischen Batterie geleitet wird, wählte man dicken Draht in wenigen Lagen, während man für die Spirale des Induktionsstromes sehr viele Windungen eines dünnen Drahtes nahm.

Da nach Ampère statt einer Stromspirale auch ein Magnet genommen werden kann, und da ferner Schließen und Unterbrechen eines Stromes gleichbedeutend sein muß mit Nähern und Entfernen eines Stromes beziehungsweise eines Magnets, so leuchtet ohne weiteres ein, daß Induktionsströme auf mehrfache Weise erzeugt werden können. Die Induktion mittelst eines Stromes bezeichnet man als Elektro-Induktion (auch Volta-Induktion), die mittelst eines Magnets als Magneto-Induktion. Es giebt im ganzen acht verschiedene Wege, auf denen man Induktionsströme herstellen kann: 1. Wenn man einen Strom schließt, so entsteht in einem nahen Leiter ein Strom von entgegengesetzter Richtung. 2. Wenn man einen Strom öffnet, so entsteht in einem nahen Leiter ein Strom von gleicher Richtung. 3. Wenn man einen Strom einem Leiter nähert, so entsteht in diesem ein Strom von entgegengesetzter Richtung. 4. Wenn man einen Strom von einem Leiter entfernt, so entsteht in diesem ein Strom von gleicher Richtung. 5. Wenn man in der Nähe eines Leiters Magnetismus erregt,

so entsteht in dem Leiter ein Strom, welcher in Bezug auf die Ampèreschen Ströme des Magnets entgegengesetzte Richtung hat. 6. Wenn in der Nähe eines Leiters Magnetismus verschwindet, so entsteht in dem Leiter ein Strom, welcher mit den Ampèreschen Strömen des Magnets gleiche Richtung hat. 7. Wenn man einen Magnet einem Leiter nähert, so entsteht in dem Leiter ein Strom, welcher in Bezug auf die Ampèreschen Ströme des Magnets entgegengesetzte Richtung hat. 8. Wenn man einen Magnet von einem Leiter entfernt, so entsteht in dem Leiter ein Strom, welcher mit den Ampèreschen Strömen des Magnets gleiche Richtung hat.

Zwei Gruppen wichtiger Apparate verdanken den obigen Gesetzen ihre Entstehung. Die eine dieser beiden Gruppen erreichte mit dem mächtigen Ruhmkorffschen Funkeninduktor bereits anfangs der fünfziger Jahre ihre größte Vollkommenheit. Die andere Gruppe machte verschiedene Wandlungen durch und ist erst in dem letzten Jahrzehnt so verbessert, daß eine weitgehende Umgestaltung nicht mehr zu erwarten ist. Während aber jene Induktionsapparate niemals über die Schwelle des physikalischen Kabinets hinausgetreten sind, haben sich die letzteren, in ihrer vollendetsten Form unter dem Namen Dynamos bekannt, einen sicheren Platz in der hochentwickelten Technik der Neuzeit erobert.

Nach diesen erläuternden Vorbemerkungen wollen wir uns nun zu der genaueren Betrachtung der elektrischen Maschinen selbst wenden. Die erste Form derselben bezeichnet man als magnetoelektrische, weil die Elektrizität durch den Einfluß eines Magnets auf einen Elektromagnet entsteht. Bereits ein Jahr nach der Entdeckung der Induktion durch Faraday, also 1832, wurden die ersten derartigen Maschinen von zwei Forschern konstruiert, welche unabhängig voneinander arbeiteten. Der eine war Salvatore del Negro, Professor der Physik in Padua,

der andere Pixii in Paris. Beide hatten folgende Vorrichtung ersonnen: Ein großer Hufeisenmagnet konnte rasch um seine Achse gedreht werden. Unmittelbar vor seinen Polen war ein hufeisenförmig gebogener Elektromagnet befestigt. Das eine Ende des Leitungsdrahtes tauchte in Quecksilber, während das andere dicht über der Oberfläche des Quecksilbers endete. Drehte man nun den Magnet rasch um seine Achse, so sprangen zwischen dem freien Drahtende und dem Quecksilber unausgesetzt elektrische Funken über. Da man bald erkannte, daß in zweckmäßig konstruirten Maschinen der Magnet von viel größerem Gewicht sein muß als der Elektromagnet, so legte man den ersteren fest und setzte den letzteren in Bewegung. Der Elektromagnet, dessen Spiralen man nur eine geringe Länge, ~~aber eine große~~ Anzahl Drahtlagen gab, wurde dicht vor den Polen des Magnets mittelst einfacher Uebertragung in rasche Drehung versetzt.

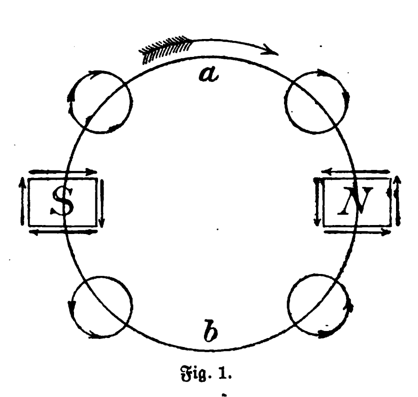


Fig. 1.

Zur Auffindung der *Stromrichtung* in diesen Maschinen wollen wir die Figur 1 benutzen. Bewegt sich die Drahtspirale auf dem oberen Halbkreise unserer Figur in der Richtung des großen Pfeils, so werden in derselben, weil sie sich vom Südpol entfernt, nach dem achten Faradayschen Induktionsgesetz Ströme erzeugt, welche rechts herum laufen. Ströme von derselben Richtung entstehen aber auch, weil sich die Spirale auf diesem Wege dem Nordpol nähert (7. Gesetz). Auf dem unteren Halbkreis sind sämtliche Verhältnisse umgekehrt, und daher werden hier in der Spirale links herum laufende Ströme erzeugt.

Bis jetzt haben wir nur die Wirkung des festliegenden Magnets auf die Spirale betrachtet; es ist uns daher noch übrig zu untersuchen, welchen Einfluß die Eisenkerne der Drahtrollen auf die Strombildung haben. Die Eisenkerne wechseln bei jedem vollen Umlaufe zweimal die Pole und zwar in den Punkten a und b, während sie in den Punkten N und S am stärksten magnetisch sind. Folgen wir dem einen Eisenkern auf seinem Wege von S an gerechnet. Vor S selbst ist er an seinem freien Ende nordmagnetisch, d. h. die Ampèreschen Ströme gehen links herum, sie haben also, da uns in unserer Figur die Polfläche abgewendet liegt, dieselbe Drehungsrichtung wie im Südpol des festliegenden Magnets. Da nun auf dem Wege von S nach a der Magnetismus abnimmt, so müssen nach dem sechsten Induktionsgesetz in der Spirale rechts herum laufende Ströme entstehen. Auf dem Wege von a nach N entsteht Südmagnetismus, die Ampèreschen Ströme im Eisenkern haben daher jetzt zwar entgegengesetzte Richtung, sind aber von derselben Wirkung auf die Spirale, da der Magnetismus zunimmt. (5. Gesetz). Es entstehen somit auch durch den Magnetismus des Eisenkerns auf dem ganzen oberen Halbkreise rechts herum laufende Ströme. Auf dem unteren Halbkreise müssen links herum laufende Ströme entstehen, weil hier alle Verhältnisse umgekehrt sind. Die Wirkungen des festliegenden Magnets und die der Eisenkerne des Elektromagnets verstärken sich also gegenseitig bei der Stromerzeugung in den rotirenden Drahtspiralen. Das eine Ende des Leitungsdrahtes war an der metallischen Drehungsachse befestigt, während das andere an eine isolirt über die Drehungsachse geschobene Metallhülse gelöthet war. Gegen die Drehungsachse selbst, sowie gegen die Metallhülse ließ man metallische Federn schleifen. Wenn man dann diese Federn durch einen Draht verband, so ging durch diesen ein Strom,

welcher jedesmal dann seine Richtung ändern mußte, wenn die Spulen vor den Magnetpolen vorbeigingen.

Da sich nun aber ein Strom, der jeden Augenblick seine Richtung ändert, nur in wenigen Fällen verwerthen läßt, so war die nächste Aufgabe der Physiker, eine Vorrichtung zu ersinnen, mittelst welcher es möglich ist, die verschieden gerichteten Ströme der Maschine in einer und derselben Richtung durch den äußeren Schließungsdraht zu senden. Man nennt eine solche Vorrichtung Stromwender oder Kommutator. Figur 2 stellt einen solchen in der einfachsten Ausführung vor. Auf der Drehungsachse sind zwei halbcylindrische Metallbleche so befestigt, daß sie unter sich und von der Achse durch nichtleitende Schichten getrennt sind. Nach jedem dieser beiden Halbcylinder führt je ein Ende des Drahtes des Elektromagnets. Die Enden des äußeren Schließungsdrahtes drücken mit zwei Federn gegen die Achse, die eine von oben, die andere von unten. Die Drehung erfolgt rechts herum, also von S nach oben und dann nach N. Wie bereits erläutert, entsteht dann in der auf dem oberen Halbkreise sich bewegenden Spirale ein rechts herumlaufender Strom, während in der anderen sich zu gleicher Zeit ein links herum laufender Strom bildet. Da nun die jeweilig oben laufende Spirale immer nur mit der oberen Feder in leitender Verbindung ist, so geht der Strom immer von der oberen Feder durch den Schließungsdraht nach der unteren Feder u. s. w., seine Richtung bleibt also im Schließungsdraht stets dieselbe.

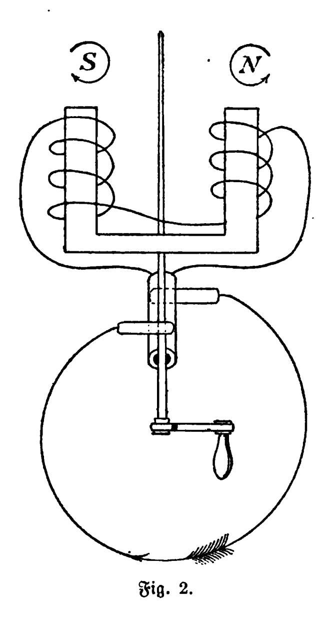


Fig. 2.

Um möglichst starke Wirkungen mit den magneto-elektrischen Maschinen zu erzielen, nahm man zunächst darauf Bedacht, die Magnete zu vergrößern. Weil aber dicke Stahlmassen nur sehr unvollkommen magnetisirt werden können, stellte man dünne gleichgroße Magnete her und legte sie so aufeinander, daß alle Südpole unter sich und alle Nordpole unter sich vereinigt waren. Bald sah man jedoch ein, daß nicht die Vergrößerung der Magnete allein zum Ziele führen konnte, sondern daß es darauf ankam, mehrere große Magnete in einer Maschine zu vereinigen. Der Erste, welcher diesen Gedanken praktisch verwerthete, war Stöhrer in Leipzig. Er verband zunächst drei große Magnete, so daß ihre Schenkel unter sich parallel waren und die sechs Pole in gleichen Abständen auf einem Kreise lagen, Nordpol und Südpol miteinander abwechselnd. Vor diesen Polen wurden 6 Drahtrollen mit Eisenkernen gedreht, welche gleichfalls in einem Kreise in gleichen Abständen befestigt waren. Durch einen Stromwender konnten sämtliche Ströme in gleiche Richtung gebracht werden. Später vereinigte Stöhrer sogar 8 Magnete und 16 Induktionsrollen in gleicher Weise.

Die größten magnetelektrischen Maschinen wurden von 1863 ab von der französischen Gesellschaft l'Alliance gebaut. Man ging bis zu 48 großen Magneten und 96 Induktionsrollen. Diese Maschinen entwickelten so starke Ströme, daß sie trotz ihrer Kostspieligkeit vielfach zu Beleuchtungszwecken verwendet wurden, z. B. auf großen Bauplätzen und Leuchtthürmen, sowie in Paris während der Belagerung 1870/71. Lange konnten sich jedoch diese Maschinen nicht als die besten behaupten; sie sollten bald von anderen vollkommeneren verdrängt werden.

Bereits im Jahre 1857 hatte nämlich W. Siemens in Berlin eine Verbesserung an den magnetelektrischen Maschinen angebracht, welche verhältnißmäßig starke Ströme zu erzeugen gestattete. Er befestigte eine größere Anzahl Magnete in paralleler

Lage, so daß alle Nordpole auf der einen und alle Südpole auf der anderen Seite waren, und ließ zwischen den Polen einen Eisencylinder rotiren, welcher der Länge nach mit zwei sich gegenüberliegenden tiefen Rillen versehen war. Längs diesen Rillen war der Cylinder mit Leitungsdraht umwickelt. Diese Vorrichtung nannte Siemens Cylinderinduktor. Damit die Magnetpole dem Cylinderinduktor möglichst genähert werden konnten, erhielten die Hufeisenmagnete auf der Innenseite kleine Ausschnitte. Figur 3 enthält einen der Magnete und den Querdurchschnitt des Cylinderinduktors. Da nach jeder halben Umdrehung die Pole in dem Eisenkern umgekehrt werden, so müssen auch die entstehenden Induktionsströme bei jeder Umdrehung die Richtung wechseln. Durch Anfügen eines Stromwenders kann man diese Ströme in einerlei Richtung durch den Schließungsdraht senden. Da der Cylinderinduktor einen verhältnißmäßig kleinen Durchmesser hat, so folgen die einzelnen Induktionsströme sehr rasch aufeinander, und ihre Wirkung nähert sich daher bedeutend mehr der Wirkung des ununterbrochen fließenden Stromes der galvanischen Batterie, als dies bei der älteren Konstruktion der Fall war. Am besten spricht für die Siemensschen Maschinen der Umstand, daß sie in tausenden von Exemplaren unter dem Namen Läuteinduktoren bei den Eisenbahnen in Dienst gestellt wurden, um die Ströme für die Ingangsetzung der Signalglocken zu liefern. Diese Maschinen enthalten 28 einfache starke Magnete und liefern Ströme, welche stärker sind als die von 100 galvanischen Elementen. Durch ihre große Zuverlässigkeit wurde sogar die Sicherheit im Eisenbahnverkehr recht bedeutend erhöht.

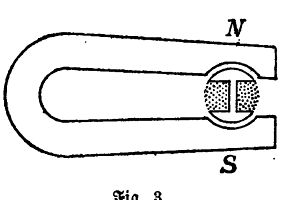


Fig. 3.

Auf dem von Siemens eingeschlagenen Wege weitergehend, gelang es im Anfange des Jahres 1866 Wilde in Manchester,

durch galvanische Ströme von ganz außerordentlicher Stärke großes Aufsehen zu erregen. Er verband eine Siemenssche magnet-elektrische Maschine mit zwei anderen, in denen statt der Magnete Elektromagnete benutzt wurden. Der Strom, welcher in der ersten Maschine erzeugt wurde, ging durch die Elektromagnete der zweiten, und der Cylinderinduktor dieser zweiten Maschine lieferte den Strom, welcher durch die Elektromagnete der dritten Maschine ging. Der Strom des Cylinderinduktors dieser dritten Maschine endlich wurde zu den Experimenten benutzt. Die erste Maschine enthielt 16 Stahlmagnete, deren Gesammttragkraft 160 Kilogramm betrug. Zu den Schenkeln des Elektromagnets der zweiten Maschine waren Eisenplatten von 66 Centimeter Höhe, 91 Centimeter Breite und 3 Centimeter Dicke, sowie 1000 Meter dicker Kupferdraht verwendet. Seine Tragkraft war beinahe 5000 Kilogramm. Eine Beschreibung der dritten Maschine und der mit ihr angestellten Experimente findet sich im „Athenäum“: „In der Maschine selbst lag schon etwas Achtunggebietendes, da die Elektromagnete aus 1,22 Meter hohen und 25 Centimeter dicken, 14 Centner Kupferdraht enthaltenden Schenkeln bestanden, zwischen denen ein Cylinderinduktor lag, der durch die außerhalb des Gebäudes aufgestellte Dampfmaschine von 15 Pferdekräften mit einer Geschwindigkeit von 1500 Touren in der Minute gedreht wurde. Um und um flogen die Cylinder (der drei Maschinen), und jede Rotation sandte neue elektrische Ströme in die Elektromagnete, als plötzlich der freie aus der Maschine heraustretende Strom mit voller Kraft in eine am Ende des Versuchslokales aufgestellte elektrische Lampe geleitet wurde, und sofort zwischen den fingerdicken Kohlenstäben ein ungemein intensives elektrisches Licht vor den Augen der Zuschauer aufflammte, das sie ebenso blendete, wie die Mittagssonne und alle Ecken und Winkel des großen Saales mit einem Glanz erleuchtete, der den Sonnenschein

übertraf, und gegen welchen die hell brennenden Gasflammen in der Mitte des Zimmers braun erschienen. Ein in der Richtung des Lichtstrahls gehaltenes Brennglas brannte Löcher in das Papier, und wer die Wärme mit ausgestreckter Hand auffing, konnte dieselbe in einer Entfernung von 50 Meter noch deutlich wahrnehmen. Dann spannte man eine lange eiserne Drahtschlinge in die Leitung ein; nach wenigen Minuten glühte der Draht, nahm eine mattrothe Farbe an, wurde weißglühend und fiel in glühenden Stücken zu Boden. Ebenso wurde ein kurzes Stück Eisen von der Dicke eines kleinen Fingers geschmolzen und verbrannt; aber alle die Versuche wurden überstrahlt von dem Schmelzen des schwerflüssigsten Metalles, eines Platinstabes von mehr als 6 Millimeter Durchmesser und 61 Centimeter Länge."

Diese gewaltigen Leistungen verschafften der Wildeschen Maschine bald Eingang in verschiedenen Industriestätten. Namentlich fand sie Verwendung für galvanoplastische Arbeiten, zur Ozonbereitung und zur Lichtentwickelung für photographische Zwecke. Aber auch ihr Stern, der zuerst alles Dagewesene mit seinem Glanze überstrahlt hatte, sollte bald erbleichen. Je genauer man diese Maschine nämlich kennen lernte, desto deutlicher traten auch ihre Mängel hervor; insbesondere war es der rasche Wechsel des Magnetismus in den Eisenkernen der Induktionscylinder, welcher diese letzteren recht stark erwärmte und dadurch den galvanischen Strom schwächte. Es war infolgedessen nicht möglich, durch diese Maschine auf längere Zeit Ströme von gleichmäßiger Stärke zu erzeugen. Von der Nothwendigkeit, gerade diese Forderung an die elektrischen Maschinen stellen zu müssen, hatte man sich aber bereits hinreichend überzeugt.

Es würde uns hier zu weit führen, wenn wir noch all der anderen Versuche gedenken wollten, welche man anstellte,

um leistungsfähige Maschinen zu erhalten. Der heutige Stand der Elektrotechnik verweist alle diese sowie alle oben beschriebenen elektrischen Maschinen in das Gebiet der Geschichte. Und wenn auch noch einige Jahre hindurch der Siemenssche Cylinderinduktor vielfache Verwendung fand, so hat doch auch er jetzt das Feld anderen Vorrichtungen gegenüber vollständig räumen müssen.

Die neue Periode, in der wir jetzt noch stehen, wird eingeleitet durch zwei großartige Entdeckungen: durch die Entdeckung des Paccinotti-Grammeschen Ringes und des dynamoelektrischen Prinzips von Siemens. Zu diesem letzteren wollen wir uns nun zunächst wenden.

Bereits im Dezember 1866 hatte Siemens in Berlin vor mehreren Fachgelehrten mit einer Maschine experimentirt, welche keine Stahlmagnete enthielt, sondern statt dieser einen großen Elektromagnet. Die Drahtenden des letzteren waren direkt mit den Bürsten des Stromwenders verbunden. Bevor die Maschine in Gang gesetzt wurde, hatte Siemens den Strom weniger galvanisirter Elemente durch den Leitungsdraht des Elektromagnets gehen lassen. Die Erfahrung lehrt aber, daß Eisen, welches einmal magnetisch erregt ist, dauernd geringe Spuren von magnetischer Kraft behält. Wird nun der Cylinderinduktor einer solchen Maschine gedreht, so entsteht in seiner Drahtspirale unter dem Einfluß des im Eisen des Elektromagnets zurückgebliebenen Magnetismus ein schwacher Strom, welcher durch den Draht des Elektromagnets fließt und diesen verstärkt. Dadurch findet wieder eine Verstärkung des Stromes im Cylinderinduktor u. s. w. statt, und in kurzer Zeit ist die Maschine bis zum Maximum ihrer Leistungsfähigkeit angeregt. Dies ist in kurzen Worten der Kern des Siemensschen dynamoelektrischen Prinzips. Wegen seiner ungemeinen Wichtigkeit, zugleich aber

um nachzuweisen, daß Siemens unzweifelhaft die Priorität in dieser Entdeckung zusteht trotz aller Bemühungen der Engländer, welche diese Ehre ihrem Landsmann Wheatstone retten wollten, wollen wir Siemens' eigne Auseinandersetzungen, welche sich im Februar-Heft 1867 der Poggendorffschen Annalen finden unter der Ueberschrift: „*Ueber die Umwandlung von Arbeitskraft in elektrischen Strom ohne Anwendung permanenter Magnete*", hier wörtlich folgen lassen:

„Wenn man zwei parallele Drähte, welche Theile des Schließungskreises einer galvanischen Kette bilden, einander nähert oder voneinander entfernt, so beobachtet man eine Schwächung oder eine Verstärkung des Stromes der Kette, je nachdem die Bewegung im Sinne der Kräfte, welche die Ströme aufeinander ausüben, oder im entgegengesetzten Sinne stattfindet. Dieselbe Erscheinung tritt in verstärktem Maße ein, wenn man die Polenden zweier Elektromagnete, deren Windungen Theile desselben Schließungskreises bilden, einander nähert oder voneinander entfernt. Wird die Richtung des Stromes in dem einen Draht im Augenblick der größten Annäherung und Entfernung umgekehrt, wie es bei elektrodynamischen Rotationsapparaten der elektromagnetischen Maschinen auf mechanischem Wege ausgeführt wird, so tritt eine dauernde Verminderung der Stromstärke der Kette ein, sobald der Apparat sich in Bewegung setzt. Diese Schwächung des Stromes der Kette durch Gegenströme, welche durch die Bewegung im Sinne der bewegenden Kräfte erzeugt werden, ist so bedeutend, daß sie den Grund bildet, warum elektromagnetische Kraftmaschinen nicht mit Erfolg durch galvanische Ketten betrieben werden können. Wird dagegen eine solche Maschine durch eine äußere Arbeitskraft im entgegengesetzten Sinne gedreht, so muß der Strom der Kette durch die jetzt ihm gleichgerichteten inducirten Ströme verstärkt werden. Da diese Verstärkung des Stromes auch eine Verstärkung des

Magnetismus des Elektromagnets, mithin auch eine Verstärkung des folgenden inducirten Stromes hervorbringt, so wächst der Strom der Kette in rascher Progression bis zu einer solchen Höhe, daß man letztere selbst ganz ausschalten kann, ohne eine Verminderung des Stromes wahrzunehmen. Unterbricht man die Drehung, so verschwindet natürlich auch der Strom, und der feststehende Elektromagnet verliert seinen Magnetismus.

Der geringe Grad von Magnetismus, welcher auch im weichsten Eisen stets zurückbleibt, genügt aber, um bei wieder eintretender Drehung das progressive Anwachsen des Stromes im Schließungskreise von neuem einzuleiten. Es bedarf daher nur eines einmaligen kurzen Stromes einer Kette durch die Windungen des festen Elektromagnets, um den Apparat für alle Zeit leistungsfähig zu machen.

Die Richtung des Stromes, welchen der Apparat erzeugt, ist von der Polarität des zurückbleibenden Magnetismus abhängig; ändert man dieselbe vermittelst eines kurzen, entgegengesetzten Stromes durch die Windungen des festen Elektromagnets, so genügt dieses, um auch allen später durch Rotation erzeugten mächtigen Strömen die umgekehrte Richtung zu geben.

Die beschriebene Wirkung muß zwar bei jeder elektromagnetischen Maschine eintreten, die auf Anziehung und Abstoßung von Elektromagneten begründet ist, deren Windungen Theile desselben Schließungskreises bilden; es bedarf aber doch besonderer Rücksichten zur Herstellung von elektrodynamischen Induktoren von großer Wirkung. Der von den kommutirten, gleichgerichteten Strömen umkreiste feststehende Magnet muß eine hinreichende magnetische Trägheit haben, um auch während der Stromwechsel den in ihm erzeugten höchsten Grad des Magnetismus ungeschwächt beizubehalten, und die sich gegenüberstehenden Polflächen der beiden Magnete müssen so beschaffen sein, daß der feststehende Magnet stets durch benachbartes Eisen

geschlossen bleibt, während der bewegliche sich dreht. Diese Bedingungen werden am besten durch die von mir vor längerer Zeit in Vorschlag gebrachte und seitdem von mir und Anderen vielfältig benutzte Anordnung der Magnetinduktoren erfüllt. Der rotirende Elektromagnet besteht bei denselben aus einem um seine Achse rotirenden Eisencylinder, welcher mit zwei gegenüberstehenden, der Achse parallel laufenden Einschnitten versehen ist, die den isolirten Umwindungsdraht aufnehmen. Die Polenden einer größeren Zahl von Stahlmagneten oder im vorliegenden Falle die Polenden des feststehenden Elektromagnets umfassen die Peripherie dieses Eisencylinders in seiner ganzen Länge mit möglichst geringem Zwischenraume.

Mit Hülfe einer derartig eingerichteten Maschine kann man, wenn die Verhältnisse der einzelnen Theile richtig bestimmt sind und der Kommutator richtig eingestellt ist, bei hinreichend schneller Drehung in geschlossenen Leitungskreisen von geringem unwesentlichen Widerstande Ströme von solcher Stärke erzeugen, daß die Umwindungsdrähte der Elektromagnete durch sie in kurzer Zeit bis zu einer Temperatur erwärmt werden, bei welcher die Umspinnung derselben verkohlt. Bei anhaltender Benutzung der Maschine muß diese Gefahr durch Einschaltung von Widerständen oder durch Mäßigung der Drehungsgeschwindigkeit vermieden werden.

Während die Leistung der magnetelektrischen Induktoren nicht in gleichem Verhältnisse mit der Vergrößerung ihrer Dimensionen zunimmt, findet bei der beschriebenen das umgekehrte Verhältniß statt. Es hat dies darin seinen Grund, daß die Kraft der Stahlmagnete in weit geringerem Verhältnisse zunimmt als die Masse des zu ihrer Herstellung verwendeten Stahles, und daß sich die magnetische Kraft einer großen Anzahl kleiner Stahlmagnete nicht auf eine kleine Polfläche konzentriren läßt, ohne die Wirkung sämtlicher Magnete be-

deutend zu schwächen oder sie zum Theil ganz zu entmagnetisiren. Magnetinduktoren mit Stahlmagneten sind daher nicht geeignet, wo es sich um Erzeugung sehr starker andauernder Ströme handelt. Man hat es zwar schon mehrfach versucht, solche kräftige magnetelektrische Induktoren herzustellen und auch so kräftige Ströme mit ihnen erzeugt, daß sie ein intensives elektrisches Licht gaben, doch mußten diese Maschinen kolossale Dimensionen erhalten, wodurch sie sehr kostbar wurden. Die Stahlmagnete verloren bald den größten Theil ihres Magnetismus und die Maschine ihre anfängliche Kraft.

Neuerdings hat der Mechaniker Wilde in Birmingham die Leistungsfähigkeit der magnetelektrischen Maschinen dadurch wesentlich erhöht, daß er zwei Magnetinduktoren meiner oben beschriebenen Konstruktion zu einer Maschine kombinirte. Den einen größeren dieser Induktoren versieht er mit einem Elektromagnet an Stelle der Stahlmagnete und verwendet den anderen zur dauernden Magnetisirung dieses Elektromagnets. Da der Elektromagnet kräftiger wird als die Stahlmagnete, welche er ersetzt, so muß auch der erzeugte Strom durch diese Kombination in mindestens gleichem Maße verstärkt werden.

Es läßt sich leicht erkennen, daß Wilde durch diese Kombination die geschilderten Mängel der Stahlmagnet-Induktoren wesentlich vermindert hat. Abgesehen von der Unbequemlichkeit der gleichzeitigen Verwendung zweier Induktoren zur Erzeugung eines Stromes, bleibt sein Apparat doch immer abhängig von der unzuverlässigen Leistung der Stahlmagnete.

Der Technik sind gegenwärtig die Mittel gegeben, elektrische Ströme von unbegrenzter Stärke auf billige und bequeme Weise überall da zu erzeugen, wo Arbeitskraft disponibel ist. Diese Thatsache wird auf mehreren Gebieten derselben von wesentlicher Bedeutung werden."

Man sieht aus diesen Auseinandersetzungen, daß Siemens

das Prinzip seiner neuen Maschine vollkommen klar erfaßt hatte. Wheatstone theilte seine Beobachtungen über diesen selben Punkt erst am 14. Februar 1867 in einer Sitzung der Royal Society mit unter dem Titel: „On the Augmentation of the Power of a Magnet by the Rotation thereon of Currents induced by the Magnet itself“, und es unterliegt daher keinem Zweifel, daß Siemens die Ehre der Priorität zusteht. Die Ansichten, die Wheatstone in seinem Vortrage entwickelte, deckten sich im wesentlichen mit denen von Siemens, und es bleibt nur räthselhaft, daß er der Entdeckung von Siemens gar keine Erwähnung that, obgleich dieselbe schon sechs Wochen vorher öffentlich bekannt gegeben war.

Es dürfte hier die passendste Stelle sein, um einige kurze Bemerkungen über die Eintheilung der elektrischen Maschinen in zwei Hauptgruppen, nämlich in Wechselstrom- und Gleichstrommaschinen einzuschalten. Alle bisher beschriebenen Maschinen sind Wechselstrommaschinen; nur durch eine besondere Vorrichtung, den Stromwender, ist man im stande, die Wechselströme der Maschine in einer und derselben Richtung durch den äußeren Leitungsdraht zu senden. Die Gleichstrommaschinen, zu denen wir uns im folgenden wenden wollen, liefern dagegen direkt, also ohne Anwendung eines Stromwenders, gleichgerichtete Ströme. Es sei auch noch darauf hingewiesen, daß gerade diese Maschinen es sind, welche die mannigfaltigste Verwendung in der Industrie gefunden haben; denn wenn auch für manche Zwecke, z. B. für die Herstellung eines elektrischen Bogenlichtes, die Wechselstrommaschinen gewisse Vortheile[6] bieten, wenn sie bei Fernleitungen, weil für ihre hochgespannten Ströme nur dünner Leitungsdraht erforderlich ist, namentlich seit Erfindung der Transformatoren,[7] immer noch eine wichtige Rolle spielen, so ist doch unzweifelhaft festgestellt, daß sie im Gesamteffekt ihrer Leistungen den Gleichstrommaschinen wesentlich nachstehen.

Rationelle Verwendung des Materials ist aber die erste Bedingung, welche die Industrie betreffs ihrer Werkzeuge stellen muß.

Der wesentlichste Theil der Gleichstrommaschinen, die wir jetzt besprechen wollen, ist der Ringinduktor. Bevor wir jedoch die Erklärung desselben unternehmen, wollen wir einige kurze geschichtliche Bemerkungen vorausschicken. Im Jahre 1860 konstruirte Antonio Paccinotti in Florenz für die Universität Pisa eine Ringmaschine. Eine ausführliche Beschreibung derselben wurde aber erst einige Jahre später in dem Journal „Il Nuovo Cimento“ veröffentlicht. Der betreffende Band trägt die Jahreszahl 1863, kann aber erst 1865 fertiggestellt sein, weil darin auch eine Abhandlung aus diesem Jahre enthalten ist. Aus dem Wortlaut der Paccinottischen Aufzeichnungen geht deutlich hervor, daß ihr Verfasser die Theorie seines Ringes klar erfaßt hatte. Außerdem ist erwiesen, daß er leistungsfähige Ringmaschinen konstruirte, in denen er theils Stahl-, theils Elektromagnete verwendete. Es unterliegt sonach keinem Zweifel, daß die Geschichte der Physik Paccinotti als den ersten Erfinder des Ringinduktors nennen muß. Trotzdem aber läßt sich nicht leugnen, daß der Ringinduktor erst durch seinen zweiten Erfinder Gramme die Würdigung erfuhr, die ihm gebührt. Zénobe Gramme aus Belgien war in der Gesellschaft l'Alliance als Modelltischler beschäftigt und hatte sich schon mehrere Patente über elektrische Lichtmaschinen erworben, als er im Jahre 1871 den Ringinduktor herstellte, ohne eine Ahnung davon zu haben, daß diese Erfindung bereits gemacht war. Dafür, daß Gramme seine Erfindung selbständig gemacht hat, spricht schon der Weg, den er einschlug. Er ließ nämlich zuerst einen Magnet innerhalb eines feststehenden hohlen Eisenringes rotiren, welcher mit Leitungsdraht umwickelt war, und kam später erst auf den Gedanken, den Magnet, bezw. Elektromagnet, festzulegen und

den Ring in Drehung zu versetzen. Die Anordnung der einzelnen Theile wurde überdies unter Grammes geschickter Hand eine wesentlich andere als bei Paccinotti. Der Ring wurde auf

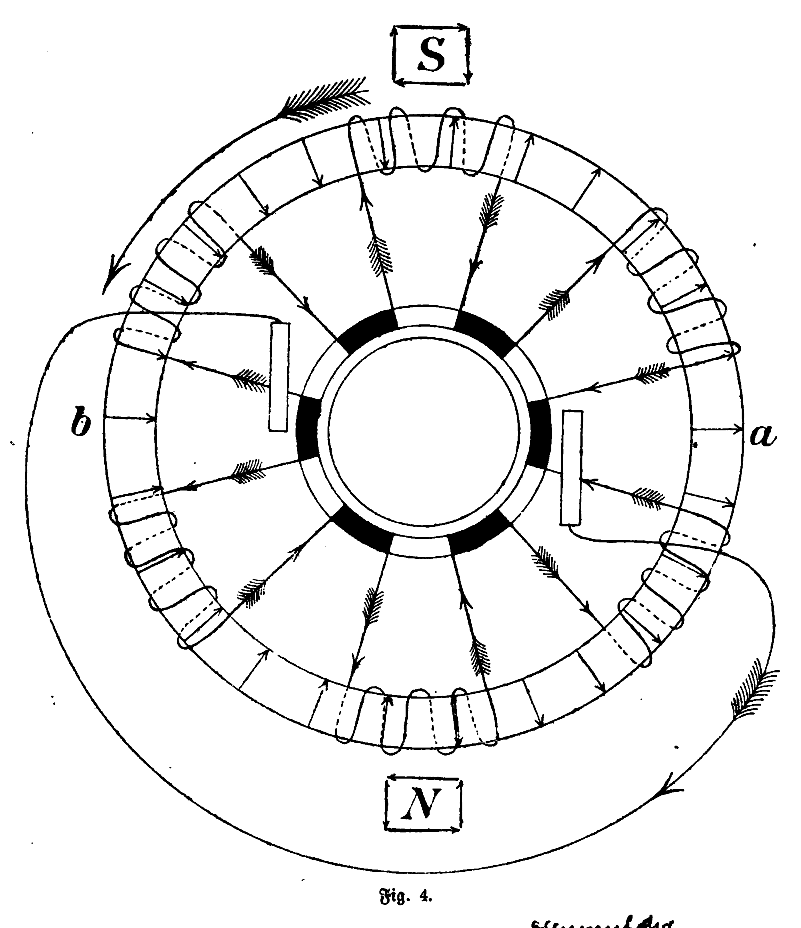


Fig. 4.

das kleinste Maß gebracht, und der Stromsammler, von Paccinotti fälschlich Stromwender genannt, unmittelbar an den Induktorring angeschlossen. Der Stahlmagnet wurde mit so-

genannten Polschuhen derart versehen, daß der Ring fast rundherum von magnetischer Kraft umschlossen war. Wegen der gedrungenen Form des Ringes war es möglich, die Umdrehungsgeschwindigkeit recht hoch zu nehmen, und dies war von besonderem Vortheil für die Stromsteigerung.

Nach diesen geschichtlichen Bemerkungen wollen wir uns nun mit Hülfe der Figur 4 die Entstehung des elektrischen Stromes in dem Ringinduktor klar machen. Der äußere Ring ist aus Eisen hergestellt und wird durch einen starken Elektromagnet in zwei halbkreisförmige Magnete verwandelt, welche bei S mit ihren Nordpolen, bei N mit ihren Südpolen aneinander stoßen. Die Pfeile auf dem Ringe deuten die Ampèreschen Ströme an. Der Ring ist mit einer großen Anzahl Drahtspiralen umgeben, deren in unserer Figur nur sechs gezeichnet sind. Auf der Achse befindet sich der Stromsammler, welcher aus so viel Leitungsstücken besteht, wie Spiralen vorhanden sind. Die Leitungsstücke (in der Figur schwarz) sind durch nichtleitende Substanz voneinander und von der stählernen Achse getrennt. Die beiden Drahtenden der einzelnen Spiralen sind mit je zwei aufeinander folgenden Leitungsstücken verbunden. Von rechts und von links werden Kupferdrahtbürsten durch schwache Federn gegen den Stromsammler gedrückt.[8] Der große Pfeil zwischen S und b giebt die Drehungsrichtung des Ringes an. Wird der Ring um seine Achse gedreht, so bleibt die magnetische Vertheilung trotz der Bewegung des Eisens fest liegen, so daß also immer oben 2 Nordpole und unten 2 Südpole zusammenstoßen; die Spiralen dagegen ändern fortwährend ihre Lage in Bezug auf die magnetische Vertheilung im Ringe.

Wir wollen nun zunächst untersuchen, welche Wirkung die halbkreisförmigen Magnete auf die Spiralen ausüben, wenn diese sich in unmittelbarer Nähe der Punkte a, S, b, N bewegen. Während eine Spirale sich in der Nähe von S befindet, muß

in ihr nach dem achten Faradayschen Induktionsgesetz ein Strom entstehen, welcher mit den Ampèreschen Strömen zwischen S und a dieselbe Richtung hat, nach dem siebenten Induktionsgesetz ein Strom, welcher zu den Ampèreschen Strömen zwischen S und b entgegengesetzte Richtung hat; beide Stromgruppen wirken also in demselben Sinne auf die Spirale bei S. Die Richtung des entstehenden Stromes ist durch Pfeile angegeben. Genau in derselben Weise erklärt sich die Strombildung in der Nähe von N. Bewegt sich eine Spirale in unmittelbarer Nähe von a, so ist die Wirkung der Ampèreschen Ströme zwischen a und N gleich und entgegengerichtet derjenigen Wirkung, welche die Ampèreschen Ströme zwischen a und S ausüben, es kann also in der Spirale kein Strom entstehen. Genau dasselbe gilt in Bezug auf den Punkt b. Je weiter nun aber eine Spirale von a nach S vorrückt, desto mehr gewinnen die Ampèreschen Ströme hinter ihr die Oberhand über diejenigen vor ihr; das Maximum der Wirkung muß also bei S eintreten. Von S nach b sinkt die Wirkung auf Null zurück. Ebenso wächst der Strom auf dem Wege von b nach N und nimmt ab auf dem Wege von N nach a. Wir sehen also, daß die Ströme in allen Spiralen des oberen Halbkreises unter sich dieselbe Richtung haben. Dasselbe gilt vom unteren Halbkreis. Der Uebergang des Stromes von einer Spirale auf die folgende wird durch das dazwischen liegende Leitungsstück des Stromsammlers vermittelt. Der Strom des oberen Halbkreises trifft mit dem des unteren Halbkreises in dem am weitesten nach rechts liegenden Leitungsstück zusammen. Der Gesamtstrom geht durch die Drahtbürste und den Schließungsdraht nach der links befindlichen Bürste, um sich hier wieder in zwei gleiche Theile zu spalten u. s. w.

Die Zahl der Spiralen ist sehr verschieden, bei den kleinsten sind es 20 bis 30, bei den größten über 100. Da nun die kleinsten Maschinen in der Minute 2000 bis 3000, die größten

mehrere Hundert Umläufe machen, so müssen in jeder Minute weit über 50000 Spulen bei jedem Pole vorbeigehen. In gleicher Weise passiren auch die Leitungsstücke die Bürsten. Die nichtleitende Substanz zwischen je zwei aufeinander folgenden Leitungsstücken ist höchstens 1 bis 2 Millimeter dick. Die Bürsten schleifen sich an den Stellen, wo sie gegen den Stromsammler drücken, sehr bald etwas hohl, und daher sind die Bürsten sogar in den Augenblicken, in welchen die nichtleitende Schicht an ihnen vorübergeht, mit den Leitungsstücken in Berührung. — Diese Auseinandersetzungen lassen also als vollkommen einleuchtend erscheinen, daß die Theilströme, welche die jeweiligen beiden Halbkreise durchlaufen, von denen der eine über, der andere unter der Linie a b liegt, ebenso gleichmäßig von der einen Bürste durch den Leitungsdraht nach der anderen fließen, wie in einer galvanischen Batterie von einem Pol zum andern.

Bis jetzt haben wir angenommen, daß der Strom direkt durch den Schließungsdraht von einer Bürste zur anderen geht. Wir haben daher noch zu erörtern, wie der Strom durch die Elektromagnete und durch die einzuschaltenden Apparate geführt wird. Unter diesem Gesichtspunkt theilt man die Dynamos in drei Hauptgruppen ein: 1. Hauptschluß-, 2. Nebenschluß-, 3. Compoundmaschinen oder Maschinen mit gemischter Wicklung. Wir geben eine schematische Zeichnung, Fig. 5, der ersten Art und erklären daran auch die beiden anderen. Die beiden Theilströme des Ringinduktors R vereinigen sich durch die Bürste a zu einem Gesamtstrom. Dieser geht über die Klemme c durch die Apparate, dann über d durch den Elektromagnet und zuletzt nach b. Bei dieser Maschine muß der Widerstand der eingeschalteten Apparate im richtigen Verhältniß zu dem Widerstande der Maschine stehen. Aus diesem Grunde findet sie passende Verwendung, wenn es sich z. B. darum handelt, eine unveränderliche Zahl von Lampen zu speisen. Bei der Neben-

schlußmaschine geht ein Draht von a durch die Elektromagnete nach b, ein anderer geht von a durch die Apparate und dann direkt nach b. Da man nun in den Draht der Elektromagnete beliebige Widerstände einschalten kann, so können auch die gespeisten Apparate verschiedene Widerstände haben. Eine Nebenschlußmaschine gestattet daher die vielseitigste Anwendung und ist aus diesem Grunde die Form, welche für Schulexperimente am geeignetsten ist. Die Compoundmaschinen sind mittelst eines starken Drahtes genau ebenso gewickelt, wie die Hauptschlußmaschinen, außerdem geht aber noch ein dünner Draht von einer Bürste durch den Elektromagnet zur anderen Bürste. Die Apparate werden in den dicken Draht geschaltet. Diese Maschine regulirt sich selbst. Ist nämlich der Widerstand zwischen c und d klein, so arbeitet sie als Hauptschlußmaschine, ist er dagegen groß, so arbeitet sie als Nebenschlußmaschine. Sie findet die passendste Verwendung bei großen gewerblichen Anlagen, weil in diesem Falle oft sehr verschiedene Widerstände in die Stromleitung eingeschaltet werden.

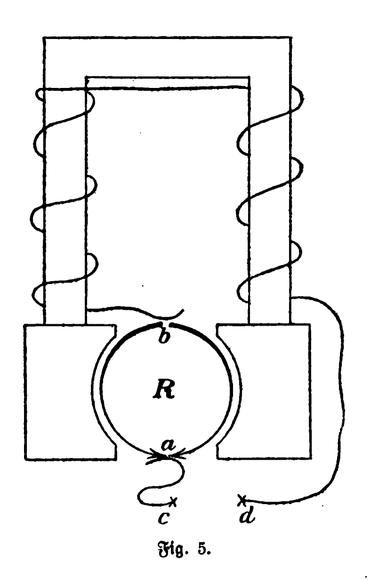


Fig. 5.

Es sei hier noch erwähnt, daß sich im Eisen des Grammeschen Ringes infolge von Induktion elektrische Ströme bilden, die sogenannten Foucaultschen Ströme. Diese Ströme wirken auf den Betrieb der Dynamomaschinen störend, da sie das Eisen des Ringes beträchtlich erwärmen und zu ihrer Entwickelung ein Theil der aufgewandten Arbeit unnöthig verbraucht wird.

Um nun die Bildung der Foucaultschen Ströme möglichst zu verhindern, stellt man den Grammeschen Ring nicht mehr aus einem festen Stück her, sondern aus dünnem Eisendraht, dessen einzelne Lagen durch isolirende Stoffe getrennt sind. Die Windungen des Eisendrahtes müssen senkrecht zur Drehungsachse stehen, weil der Leitungsdraht der Spulen parallel mit der Drehungsachse verläuft. Hierdurch sind die Foucaultschen Ströme, welche parallel mit den inducirenden verlaufen, auf ein

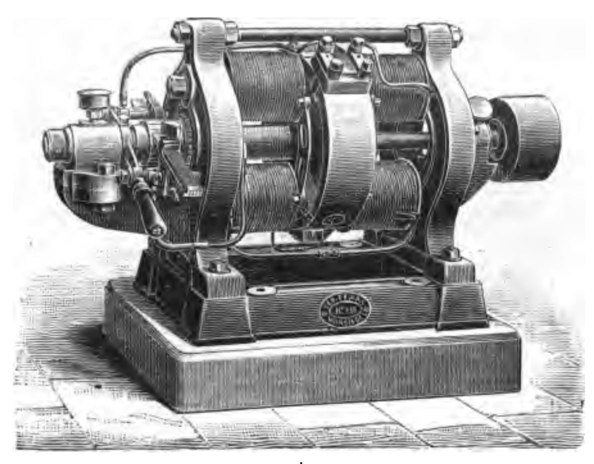


Fig. 6.

unschädliches Maß zurückgeführt, während der magnetischen Kraftströmung kein Widerstand entgegengesetzt ist.

Nachdem die Gestalt des Ringes die mannigfachsten Wandlungen durchgemacht hat, hat man sich zuletzt nach dem Vorgange von Schuckert in Nürnberg für den Flachring entschieden. Figur 6 zeigt eine Flachringmaschine, wie solche von Gebrüder Fraas in Wunsiedel gefertigt werden. Der Flachring, in der Zeichnung durch einen Blechmantel verdeckt, hat parallel mit der Achse geringere Ausdehnung als senkrecht zur

Achse und ist fast auf dem ganzen Umkreise von großen doppelten Polschuhen umgeben. Die Elektromagnete können durch eine Stöpselschaltvorrichtung (in der Abbildung nicht ersichtlich) auf Spannung oder Quantität, d. h. hintereinander oder nebeneinander geschaltet werden. Der Stromsammler liegt links und wird zum größten Theil durch die eine Bürste verdeckt. Figur 7 zeigt eine größere, mit vier Doppelelektromagneten ausgestattete

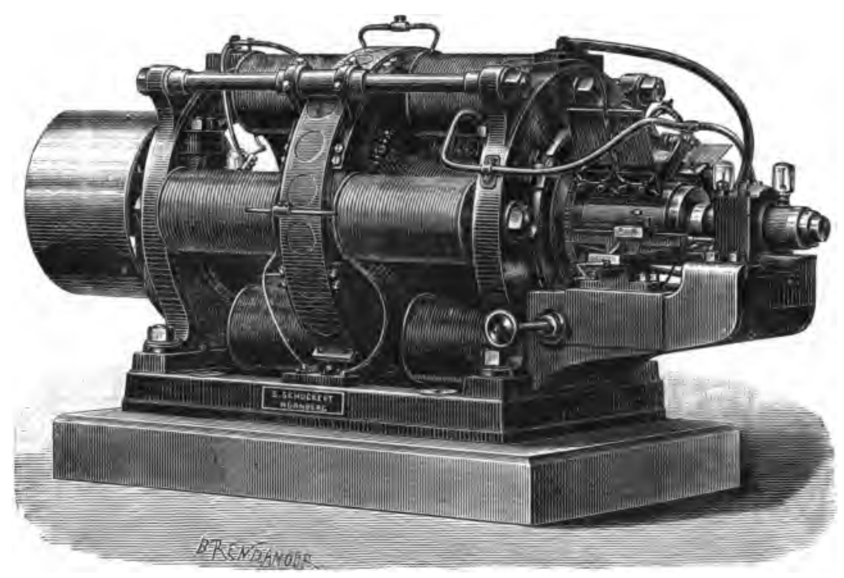


Fig. 7.

Flachringmaschine von Schuckert in Nürnberg. Zur Abnahme des Stromes sind bei dieser Maschine vier Bürsten erforderlich, von welchen in unserer Abbildung (rechts) drei sichtbar sind, während die vierte hinter dem Stromsammler liegt.

Kaum ein Jahr war nach Grammes Erfindung des Ringinduktors verflossen, als es von Hefner-Alteneck, einem Ingenieur der Elektrizitätswerke von Siemens & Halske in Berlin,

gelang, auf einem anderen Wege dasselbe Ziel zu erreichen. Der Eisenkern seines Induktors, der Trommel genannt wird, hat Cylindergestalt und ist parallel zu seiner Achse mit einer größeren Anzahl von Drahtlagen umwickelt. Figur 8 giebt eine Uebersicht über die Hauptheile der Maschine, und zwar so, daß man die Stirnfläche des Trommelinduktors vor sich hat, welche den Stromsammler trägt. Jede der schon erwähnten Drahtlagen besteht aus vielen Windungen, bildet also eine

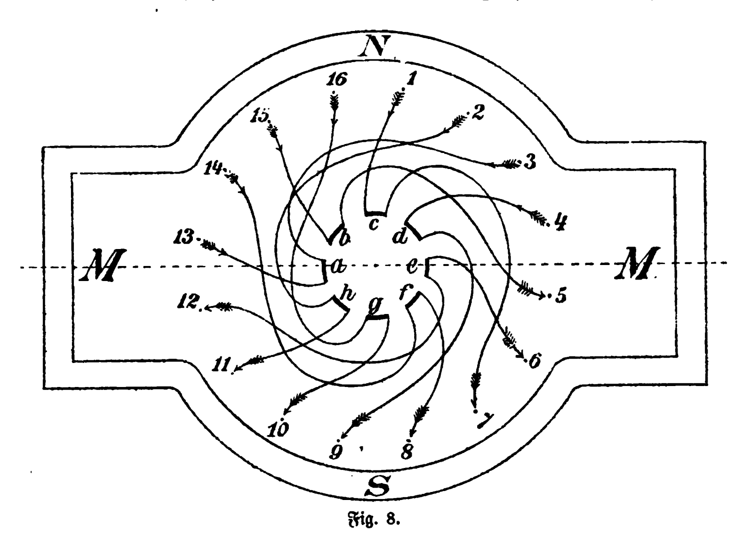


Fig. 8.

einzelne Drahtgruppe, deren beide Enden mit je einem Leitungsstück des Stromsammlers verbunden sind, und zwar so, daß ebenso wie beim Ringinduktor der Anfang und das Ende der einzelnen Gruppen an je zwei aufeinander folgende Leitungsstücke geschraubt sind. Z. B. sind 1 und 9 zwei Punkte der Stirnfläche, durch die eine Drahtgruppe geht. Von den beiden Enden derselben ist das eine mit dem Leitungsstück c, das andere mit dem Leitungsstück d verbunden, ebenso geht durch 2 und 10 eine Drahtgruppe, deren Enden nach h und g führen

u. s. w. In unserer Figur sind der besseren Uebersicht wegen nur 8 Drahtgruppen angenommen, und von diesen sind nur die $2 \times 8 = 16$ Enddrähte und ihre Verbindung mit dem Stromsammler gezeichnet. Die Trommel wird der ganzen Länge nach auf etwa zwei Drittel ihres Umfangs von zwei starken Elektromagneten umgeben, die in N mit ihren Nordpolen und in S mit ihren Südpolen zusammenstoßen. Wird nun die Trommel rasch um ihre Achse gedreht, so müssen in den einzelnen Drahttheilen Ströme entstehen, weil dieselben fortwährend ihre Lage zu den Magnetpolen ändern. Es ist daher unsere Aufgabe, zu untersuchen, wie alle diese Einzelströme sich zu einem Gesamtstrom zusammenfügen. Wir wollen zunächst eine Drahtgruppe etwa 1,9 ins Auge fassen. Wird die Trommel so gedreht, daß im oberen Theil ein Strom entsteht, welcher bei 1 heraustritt, so muß in dem unten liegenden Theil ein Strom von entgegengesetzter Richtung entstehen, welcher also bei 9 hineintritt, weil oben und unten entgegengesetzte Pole liegen. Dasselbe gilt von allen anderen Drahtgruppen und zwar so, daß alle Theile, welche jeweilig oberhalb der Linie M M liegen, den positiven Strom heraus auf die Stirnfläche senden, während alle unter M M liegenden Theile ihn von der Stirnfläche her aufnehmen. Die Verbindung mit dem Stromsammler ist so eingerichtet, daß alle diese Einzelströme zu zwei Summenströmen vereinigt werden, welche mittelst zweier Bürsten ihren Weg durch den Schließungsdraht nehmen. Die Bürsten drücken gegen die Leitungsstücke, welche gerade die Linie M M passiren. Wir wollen nun sehen, wie die Ströme der einzelnen Drahtgruppen in eine Richtung gebracht werden. Von e gehen die beiden Summenströme für die gezeichnete Stellung der Trommel aus; ihre Wege sind folgende:

e 6 14 f 8 16 g 10 2 h 11 3 a
e 12 4 d 9 1 c 7 15 b 5 13 a.

Liegen d und h in der Linie M M, so sind die Wege folgende:

d 4 12 e 6 14 f 8 16 g 10 2 h

d 9 1 c 7 15 b 5 13 a 3 11 h.

Liegen c und g in der Linie M M, so sind die Wege folgende:

c 1 9 d 4 12 e 6 14 f 8 16 g

c 7 15 b 5 13 a 3 11 h 2 10 g.

Liegen b und f in der Linie M M, so sind die Wege folgende:

b 15 7 c 1 9 d 4 12 e 6 14 f

b 5 13 a 3 11 h 2 10 g 16 8 f.

Für die noch möglichen vier Stellungen der Trommel gelten die vorstehenden Wege, von rechts nach links gelesen.

Die Verbindung der Drahtgruppen unter sich mittelst des Stromsammlers erscheint auf den ersten Blick unsymmetrisch. Daß dies in Wirklichkeit nicht der Fall ist, geht aus den vorstehenden Zahlen und Buchstaben deutlich hervor. Genau wie bei dem Ringinduktor ist hier das Ende je einer Drahtgruppe durch ein Leitungsstück mit dem Anfang der folgenden verbunden, während der Anfang und das Ende jeder einzelnen Drahtgruppe nach zwei aufeinander folgenden Leitungsstücken führen. Da nun hier auch in Bezug auf die Zahl der Drahtgruppen und die Einrichtung des Stromsammlers dasselbe gilt wie bei den Ringmaschinen, so ist klar, daß diese Maschinen ebenso wie jene einen ununterbrochenen Strom von gleicher Richtung erzeugen.

Je länger die Trommel ist, desto kürzer sind die Drahtstücke auf der vorderen und hinteren Stirnfläche im Verhältniß zu denen, welche längs der Trommel laufen. Daraus folgt, daß an langen Trommeln nur wenig Draht der inducirenden Wirkung der Elektromagnete nicht unterworfen ist. Da dieser Vorzug sich aber immer erst bei einer nicht zu geringen Länge geltend macht, so ergiebt sich auch zugleich, daß der Trommelinduktor am zweckmäßigsten in größeren Maschinen verwandt wird, während der Flachring am besten für die kleineren paßt.

Im Verlauf der Weiterentwickelung der Trommelmaschinen hat man noch die Einrichtung getroffen, daß der Eisenkern der Trommel an der Bewegung nicht theilnimmt, während die Trommel selbst, die in diesem Falle hohle Achsen hat, sich in dem Raum zwischen dem Eisenkern und den Bögen der Elektromagnete dreht. Wenn nämlich der Eisenkern gedreht wird, müssen seine Pole fortwährend ihre Lage ändern, und dadurch wird ein Theil der bewegenden Kraft zwecklos verbraucht, ja sogar wird dadurch eine nicht unerhebliche Menge Wärme entwickelt, welche auf die Induktion schädlich wirkt. Zur Abschwächung der Foucaultschen Ströme ist der Eisenkern der Trommel aus isolirtem Draht hergestellt, dessen Windungen senkrecht zur Achse verlaufen,[9] weil der Leitungsdraht parallel zur Achse liegt.

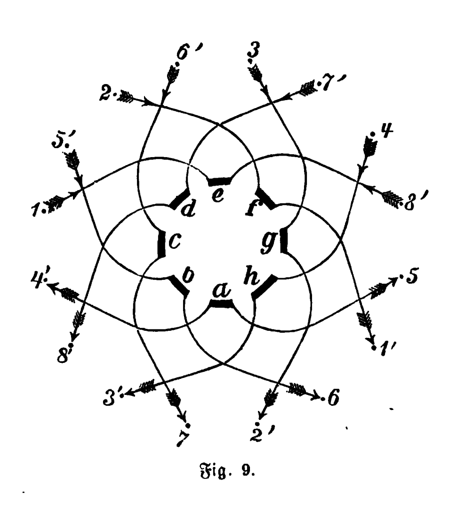


Fig. 9.

Bei den neuesten Trommelmaschinen der Firma Siemens & Halske in Berlin haben der Stromsammler und die Elektromagnete noch eine Abänderung in der Anordnung ihrer Theile erfahren, welche die Brauchbarkeit dieser Maschinen nicht unwesentlich erhöht hat. Für den Stromsammler ist jetzt allgemein die „Kreuzschaltung“ angenommen, nachdem sie schon seit Jahren in einzelnen Fällen benutzt war. Die Kreuzschaltung ist in Figur 9 schematisch dargestellt. Der besseren Uebersicht wegen sind die zwei Punkte, welche zu je einer und derselben Drahtgruppe gehören, mit derselben Zahl versehen, die eine

ohne, die andere mit Strich; es gehören also die Punkte 1 und 1′, 2 und 2′ u. s. w. zu je einer Drahtgruppe. Durch Vergleichen dieser Figur mit Figur 8 erkennt man leicht, daß die Lagerung der einzelnen Drahtgruppen eine andere ist als bei den älteren Maschinen. Während nämlich bei jenen die einzelnen Drahtgruppen genau centrisch liegen, sind sie hier ein wenig excentrisch angebracht. Aus der Figur ist außerdem ohne weiteres klar, daß die Schaltungen vollkommen symmetrisch liegen.

Die Pfeile geben die Richtung der Ströme in den einzelnen Drahtgruppen an unter der Voraussetzung, daß der eine Pol über, der andere unter der Trommel liegt. Die beiden Zweigströme, welche bei dieser Stellung der Trommel entstehen, nehmen folgenden Verlauf:

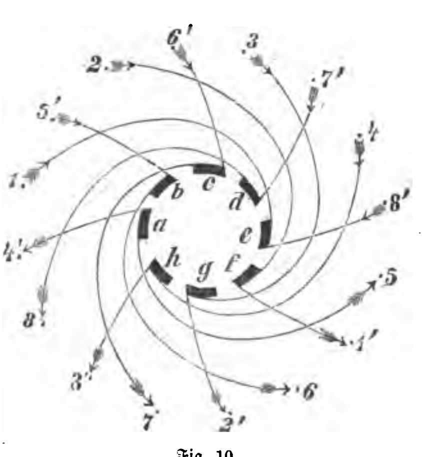


Fig. 10.

a 5 5′ b 6 6′ c 7 7′ d 8 8′ e

a 4′ 4 h 3′ 3 g 2′ 2 f 1′ 1 e

Die Bürsten, welche den Strom abnehmen sollen, müssen also an a und e anliegen. Da jedoch diese Lage der Abnahmestellen für die Stromentwickelung ungünstig ist, hat man den Stromsammler um 90° nach rechts gegen die Trommel gedreht, so daß unter Beibehaltung der obigen Trommelstellung die Leitungsstücke a und e in die Mittellinie des Elektromagnets fallen. Fig. 10 veranschaulicht also die in der wirklichen Ausführung gebräuchliche Verbindung des Stromsammlers mit den Drahtgruppen.

Liegen h und d in der Mittellinie des Elektromagnets, so nehmen die beiden Zweigströme folgende Wege:

h 4 4′ a 5 5′ b 6 6′ c 7 7′ d

h 3′ 3 g 2′ 2 f 1′ 1 e 8′ 8 d.

Liegen g und c in der Mittellinie des Elektromagnets, so nehmen die beiden Zweigströme folgende Wege:

g 3 3′ h 4 4′ a 5 5′ b 6 6′ c

g 2′ 2 f 1′ 1 e 8′ 8 d 7′ 7 c.

Liegen f und b in der Mittellinie des Elektromagnets, so nehmen die beiden Zweigströme folgende Wege:

f 2 2′ g 3 3′ h 4 4′ a 5 5′ b

f 1′ 1 e 8′ 8 d 7′ 7 c 6′ 6 b.

Für die vier anderen noch möglichen Stellungen des Stromsammlers gelten die vorstehenden Wege, von rechts nach links gelesen.

Da nun die Bürsten immer gegen die in der Mittellinie befindlichen Leitungsstücke drücken, so ergiebt sich, daß dieselben bei jeder Stellung der Trommel die entstehenden Zweigströme aufnehmen und einen Strom von gleicher Richtung durch die Drahtwindungen des äußeren Stromkreises senden.

An die Stelle des Doppelelektromagnets der älteren Maschinen ist bei den neueren ein einfacher getreten. Figur 11 giebt die Seitenansicht einer solchen Maschine. Der aufrecht stehende Elektromagnet hat starke Schenkel aus Gußeisen, welche an den Polenden zur Aufnahme der Trommel ausgebohrt sind und mit der starken Grundplatte der Maschine ein zusammenhängendes Stück bilden.

Dies ist in kurzen Zügen die Entwickelung der Dynamomaschine aus ihren ersten Anfängen her. Welche Stellung dieselbe dermaleinst in der Technik erobern wird, läßt sich mit Gewißheit noch nicht vorhersehen. Soweit man aber bis jetzt urtheilen kann, wird sie zur Kraftübertragung immer mehr

verwendet werden, ohne jedoch die Dampfmaschine überflüssig zu machen. Sie wird als Stromquelle in der Telegraphie immer weitere Verbreitung finden, sie wird als Lichtmaschine unsere jetzigen Beleuchtungsapparate mehr und mehr verdrängen, sie wird wegen der bedeutenden chemischen Wirkungen starker galvanischer Ströme neue Methoden der Metallgewinnung

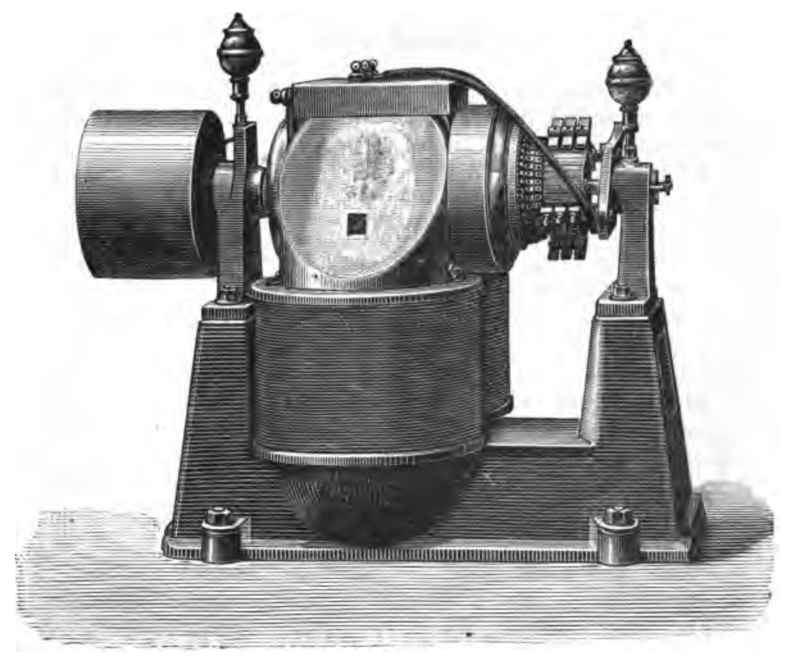


Fig. 11.

möglich machen. Die Galvanoplastik bedient sich ihrer schon jetzt fast ausschließlich.

Hiermit sind wir am Schlusse unserer Betrachtungen angelangt. Mögen dieselben ihr Scherflein mit dazu beitragen, daß die einfachsten Verhältnisse unserer schon so hoch entwickelten Elektrotechnik in immer breiteren Schichten der Laienwelt bekannt werden.

Anmerkungen.

[1] Das einfachste Element erhält man, wenn man in ein Glasgefäß auf den Grund ein Kupferblech legt und in die obere Hälfte einen Zinkblechcylinder mit übergreifendem Rand hängt. Die untere Hälfte des Gefäßes wird mit Kupfervitriollösung, die obere mit Bittersalzlösung gefüllt. Von der Kupferplatte führt ein Draht, welcher mit einem Nichtleiter, etwa Siegellack, überzogen ist, durch die Flüssigkeiten nach oben heraus. Das obere Ende dieses Drahtes (also auch des Kupfers) ist der positive Pol, das obere Ende des Zinks der negative Pol des Elementes. Verbindet man nun die freien Enden des Zinks und des Kupfers durch einen Draht (Schließungsdraht), so gleichen sich die beiden Elektrizitäten gegenseitig aus, werden aber zu gleicher Zeit auch immer wieder ergänzt, so daß die Ausgleichung ununterbrochen stattfindet, so lange das Element sich in brauchbarem Zustande befindet. Diese Bewegung der Elektrizität nennt man galvanischen Strom oder kurz Strom. Die Bewegung vom positiven Pol zum negativen nennt man positiven Strom, die entgegengesetzte negativen Strom. In der Regel braucht man nur den Ausdruck „Strom" und meint damit den positiven.

Bei anderen Elementen hat man Zink und Kohle (Bunsen) oder Zink und Platin (Grove). Diese Körper sind durch einen porösen Thoncylinder getrennt. Zink befindet sich in stark verdünnter Schwefelsäure, Platin und Kohle in konzentrirter Salpetersäure. Auch hier geht der Strom (positive) durch den Schließungsdraht nach dem Zink. Außerdem giebt es noch viele andere galvanische Elemente. Eine Vereinigung von mehreren Elementen nennt man eine Kette oder Batterie.

[2] Die Ablenkung der Magnetnadel ergiebt sich aus der Ampèreschen Regel: Denkt man sich eine menschliche Figur im Strome mit demselben schwimmend, das Gesicht der Nadel zugewendet, so schlägt für diese Figur der Nordpol immer nach links aus.

[3] Der Leitungsdraht, welcher zu Rollen (Spiralen) aufgewickelt wird, ist immer mit einer isolirenden Schicht (dünner mit Seide, starker mit Wolle) überzogen.

[4] Schweiggers Journal der Physik LVIII.

[5] Galvanometer zeigen sehr schwache Ströme an, da viele Drahtwindungen um die Nadel herumgeführt sind und dieselbe der Einwirkung des Erdmagnetismus dadurch entzogen ist, daß sie mit einer zweiten entgegengerichteten fest verbunden ist. Man nennt eine solche Nadel-Verbindung ein astatisches Nadelpaar.

[6] Bei den Bogenlampen, welche durch Gleichstrommaschinen in Gang gesetzt werden, brennt der eine Kohlenstab, durch welchen nämlich die positive Elektrizität ausströmt, bedeutend rascher ab als der andere, während bei den durch Wechselstrom gespeisten Bogenlampen beide Kohlen gleichmäßig verzehrt werden. Die Regulirvorrichtungen, welche die zweckmäßigste Entfernung zwischen den beiden Kohlenstäben herzustellen haben, müssen aus diesem Grunde bei dem Gleichstrom viel verwickelter als bei dem Wechselstrom sein. Andererseits aber haben die Wechselstromlampen den Nachtheil, daß sie ein summendes Geräusch hören lassen, was namentlich in geschlossenen Räumen recht störend wirkt.

[7] Figur 12 zeigt einen Transformator in seiner einfachsten Gestalt. Ein eiserner Ring ist mit zwei Drahtspiralen umwickelt. Geht nun durch die eine Spirale ein Wechselstrom, so wird der Eisenring wechselnd magnetisirt. Hierdurch werden aber in der zweiten Spirale Wechselströme erzeugt, welche bei Anwendung von gleichen Spiralen an Kraft dem ersten Strom nahezu gleichkommen Da man nun die Zahl der Windungen der beiden Spiralen nach beliebigem Verhältniß wählen und eine beliebige Anzahl solcher Transformatoren anbringen kann, welche untereinander durch Parallelschaltung oder Hintereinanderschaltung verbunden werden können, so kann man mittelst der Transformatoren die hohe Spannung des Maschinenstroms beliebig herabmindern und dadurch die Stromstärke vergrößern, oder man kann auch auf Kosten der Stromstärke die Spannung erhöhen.

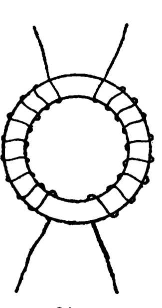


Fig. 12.

[8] In Fig. 4 sind aus Versehen die Rechtecke, welche die Kupferdrahtbürsten vorstellen sollen, nicht dicht an den Stromsammler gelegt.

[9] Mit noch besserem Erfolge fertigt man den Eisenkern aus kreisförmigen, unter sich isolirten Eisenblechen, welche gleichfalls senkrecht zur Achse liegen.

